

УДК 550.42:551.14

DOI 10.31087/0016-7894-2019-5-83-90

Образование толщ, богатых органическим веществом, в свете новой модели глобального цикла углерода

© 2019 г. | А.А. Ивлев

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева», Москва, Россия; aa.ivlev@list.ru

Поступила 09.07.2019 г.

Принята к печати 11.07.2019 г.

Ключевые слова: фотосинтез; термохимическая сульфатредукция; углеродный цикл; экологическая точка компенсации; орогенный цикл; орогенный и геосинклиальный периоды; катастрофическая смена условий обитания; массовая гибель организмов; толщи, обогащенные органическим веществом.

Динамика фотосинтеза определяется неравномерным движением литосферных плит. Циклический характер их движения определяет цикличность сопряженных с ним: круговорота углерода, эволюции фотосинтеза, накопления органического вещества в осадочных толщах, изменения климата и других процессов. Образование толщ, богатых органическим веществом, тоже происходило циклически и было связано с массовой гибелью организмов, происходившей при смене циклов из-за катастрофического изменения условий их обитания. Ключевая роль фотосинтеза в формировании нефтегенерирующих толщ позволяет выделить временной отрезок, соответствующий нефтеобразовательному процессу от рифея до палеогена. Начало нефтеобразования определяется временем (от момента возникновения фотосинтеза) накопления органического вещества в количествах, достаточных для генерации рассеянных углеводородов, позволяющих образовать залежь. Содержание кислорода в атмосфере в этот момент составляло несколько процентов. Окончание процесса соответствует достижению точки экологической компенсации, т. е. такого состояния глобального цикла углерода, когда количество образованного при фотосинтезе восстановленного углерода становится равным количеству углерода, возвращаемого в окисленную неорганическую форму. Процесс завершился в послемiocеновое время, когда снижение уровня концентрации CO₂ привело к появлению нового типа C-4 фотосинтетической ассимиляции.

Для цитирования: Ивлев А.А. Образование толщ, богатых органическим веществом, в свете новой модели глобального цикла углерода // Геология нефти и газа. – 2019. – № 5. – С. 83–90. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-5-83-90.

Formations of sequences rich in organic matter in the light of new model of global carbon cycle

© 2019 | A.A. Ivlev

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia; aa.ivlev@list.ru

Received 09.07.2019

Accepted for publication 11.07.2019

Key words: photosynthesis; thermo-chemical sulphate reduction; carbon cycle; environmental compensation point; orogenic cycle; periods of orogeny and divergence; catastrophic alternation of living conditions; massive mortality of organisms; sequences rich in organic matter.

The dynamics of photosynthesis is determined by the uneven movement of lithosphere plates. The cyclical nature of the lithosphere plates' motion determines the cyclicity of the associated factors, namely: carbon cycle, photosynthesis evolution, organic matter accumulation in sedimentary strata, climate changes, and other processes. The formation of rocks rich in organic matter also occurred cyclically; it is associated with the massive mortality of organisms that took place when cycles were changing due to catastrophic alterations in the environment. The key role of photosynthesis in the formation of oil-producing strata allows defining the oil generation interval from Riphean to Paleogene. The lower limit is determined by the time (from the moment of photosynthesis onset) of organic matter accumulation in amount sufficient to provide the dispersed hydrocarbons and allowing to form hydrocarbon accumulations. The oxygen content in the atmosphere at that moment was several percent. From above, oil generation is limited by reaching the environmental compensation point, i. e. such a state of the global carbon cycle, where the amount of carbon produced in photosynthesis becomes equal to the amount of carbon returned to the oxidized inorganic form. The upper limit was reached after Miocene, when the decrease in CO₂ concentration has led to the emergence of a new C-4 type of photosynthetic assimilation.

For citation: Ivlev A.A. Formations of sequences rich in organic matter in the light of new model of global carbon cycle. *Geologiya nefi i gaza*. 2019;(5):83–90. DOI: 10.31087/0016-7894-2019-5-83-90.

DISCUSSIONS

Фотосинтез — основной элемент механизма формирования толщ, богатых органическим веществом

Предложенная ранее модель глобального цикла углерода [1] основана на гипотезе, связывающей биосферные и геологические процессы. Ключевые положения этой гипотезы позволяют по-новому взглянуть на процессы аккумуляции ОВ в осадочных породах, на образование толщ, богатых ОВ, и генезис нефтяных УВ.

Одно из положений модели глобального углеродного цикла состоит в утверждении, что скорость накопления ОВ в осадочных породах в ходе геологического времени не была постоянной, а периодически резко изменялась. Это, прежде всего, связано с периодически меняющейся биопродуктивностью, а в конечном счете, с динамикой фотосинтеза, которая, в свою очередь, обусловлена неравномерным движением литосферных плит, обеспечивающим разную частоту их столкновения в зоне субдукции, в том числе с участием континентальных плит, в составе осадочных пород которых содержалось ОВ. В зоне субдукции за счет тепла, выделяющегося при столкновениях плит, происходила реакция термохимической сульфатредукции с окислением ОВ. В результате этого в систему атмосфера – гидросфера Земли поступали продукты окисления ОВ и углекислый газ, который инициировал фотосинтез.

Из-за изменений скорости движения плит и неодинаковых интервалов между столкновениями химическая реакция окисления протекала с разной интенсивностью. При активном движении плит, когда частота столкновений увеличивалась, окисление происходило очень интенсивно. При медленном движении интервалы времени между столкновениями существенно увеличивались и реакция окисления замедлялась. Короткие периоды интенсивного движения плит были названы орогенными (конвергентными), а длительные периоды медленного движения плит — геосинклинальными (дивергентными). Оба периода составляют орогенический цикл.

Пульсирующее поступление CO_2 в систему атмосфера – гидросфера Земли приводило к резкому повышению его концентрации в орогенный период и, следовательно, к увеличению скорости фотосинтеза. В последующий длительный геосинклинальный период фотосинтез становился доминирующим процессом, а скорость потребления CO_2 для фотосинтеза превышала скорость его поступления из зоны субдукции. В системе атмосфера – гидросфера Земли происходило постепенное истощение CO_2 , превращение его в «живое» вещество, а после его «отмирания» — образование и накопление ОВ в осадочных толщах.

Скорость фотосинтеза и тем более скорость накопления ОВ в осадочных толщах изучены не-

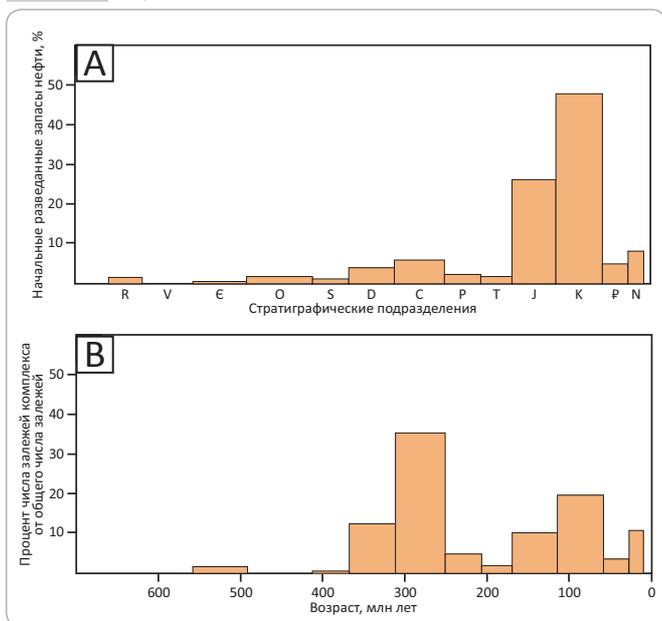
достаточно, поэтому о накоплении лучше судить по косвенным признакам, в частности по изменению поверхностной температуры на Земле в начале и конце орогенических циклов. Дело в том, что, поскольку CO_2 относится к парниковым газам, его высокая концентрация в начале цикла сопровождалась повышением температуры на Земле, а низкая концентрация в конце геосинклинального периода приводила к понижению температуры, которое заканчивалось оледенением. Это неоднократно фиксировалось многими исследователями [2]. Таким образом, оледенение является свидетельством того, что значительная часть поступившего в систему CO_2 превратилась в ОВ. Другой признак превращения значительного объема поступившего CO_2 в ОВ — это его обогащение изотопом ^{13}C , как результат фракционирования изотопов углерода при фотосинтезе. При этом возникает изотопный эффект истощения, называемый «эффектом Релея». В остаточном CO_2 в системе атмосфера – гидросфера Земли постепенно накапливается тяжелый изотоп ^{13}C . Однако автор статьи признает другой признак, свидетельствующий о завершении орогенического цикла.

При переходе от одного цикла к другому катастрофически резко менялись условия обитания организмов, адаптировавшихся в конце предшествующего цикла, что приводило к их массовой гибели. Действительно, условия с высоким содержанием кислорода в конце геосинклинального периода предшествующего орогенического цикла благодаря фотосинтезу сменяются на условия с низким содержанием кислорода и даже аноксические орогенного периода нового цикла, а низкие температуры сменяются высокими из-за резкого повышения концентрации CO_2 в орогенном периоде следующего цикла. В результате многие дышащие и холодолюбивые организмы, которые преобладают в конце геосинклинального периода, при изменении условий их обитания погибают. Массовые вымирания, которые отмечались многими исследователями [3, 4], еще более усиливаются из-за действия ряда неблагоприятных для организмов факторов, сопровождающих орогенные периоды нового цикла: повышение радиоактивного фона, поступление ядовитых кислых газов, сопровождающих вулканические эксгаляции, в том числе образующихся при сульфатредукции. Интенсивная сульфатредукция характерна именно для орогенного периода. Другими словами, смена циклов приводила к массовому вымиранию организмов. Биомасса этих организмов и становилась источником ОВ, которое сконцентрировано в нефтегазогенерирующих толщах, таких как доманикоиды, бажениты, черные сланцы. Таким образом, согласно модели, толщи, богатые ОВ, формируются при смене орогенических циклов.

Логично предположить, что нефтегенерационная способность пород пропорциональна содержанию в них ОВ. Очевидно, что образование богатых

Рисунок. Сравнение стратиграфического распределения начальных разведанных запасов нефти по крупнейшим нефтеносным бассейнам мира [6] (А) и распределения залежей нефти по стратиграфическим комплексам на территории бывшего СССР [7] (В)

Figure. Comparison of stratigraphic distribution of initial explored oil reserves across the world's largest petroleum basins [6] (A) and distribution of oil pools across stratigraphic sequences in the area of former Soviet Union [7] (B)



ОВ толщ и их нефтегенерационная способность связаны с концом орогенических циклов и переходом к новому циклу. В толщах, сформированных в другие периоды времени, эта способность заметно снижена. Таким образом, накопление ОВ в осадочных породах в ходе орогенических циклов протекало пульсационно, что впоследствии порождало нефтегенерационные волны.

Указанное согласуется с выявленным Б.А. Соколовым и О.К. Баженовой [5] неравномерным распределением доманикоидных нефтематеринских формаций, которые присутствуют практически во всех системах фанерозоя и докембрия и развиты на разных континентах на одних и тех же стратиграфических уровнях.

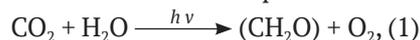
Следствием такого распределения нефтематеринских толщ является неравномерность распределения нефтей по стратиграфическим уровням. Она проявляется в неравномерном распределении мировых разведанных запасов нефти по крупнейшим нефтеносным бассейнам мира [6] (рисунок А). О том же свидетельствует и распределение залежей нефти на территории бывшего СССР [7] (см. рисунок В). В последнем случае число залежей в комплексе рассматривалось как доля, которую составляет число залежей в каждом комплексе от общего числа залежей. При этом допускалось, что территория бывшего СССР сопоставима с размером всей планеты и закономерности на них проявляются одинаково. Это подтверждается сходством распределений: одним и тем

же числом пиков, их появлением примерно в одних и тех же интервалах геологического времени.

Однако высоты прямоугольников в гистограммах различаются, что свидетельствует о том, что сравнение разведанных запасов с числом залежей не вполне корректно, поскольку сопоставляемые объекты различны (см. рисунок). В то же время их приуроченность к одним и тем же геологическим интервалам объективна.

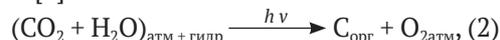
Таким образом, сделанный вывод о пульсационном накоплении ОВ можно дополнить утверждением, что эти пульсы, возникающие при смене орогенических циклов в связи с массовой гибелью организмов, являются причиной нефтегенерации.

В соответствии с уравнением фотосинтеза, по изменению содержания кислорода в атмосфере можно следить за накоплением ОВ в осадочных породах. Действительно, как было отмечено, способность пород генерировать нефтяные УВ коррелирует с содержанием в них ОВ. Кроме того, ОВ образуются при фотосинтезе в соответствии с известным выражением



где в левой части выражения приведены субстраты фотосинтеза, которые поступают из среды; в правой — продукты фотосинтеза (CH_2O — «живое» вещество).

Применительно к глобальному циклу углерода уравнение фотосинтеза можно записать следующим образом [8]:



где в левой части уравнения — субстраты фотосинтеза, поступающие из атмосферы и гидросферы; в правой части — продукты фотосинтеза (органический углерод ($\text{C}_{\text{орг}}$) — осадочное ОВ, образовавшееся из «живого» вещества). Кислород в атмосфере накапливается эквимолярно образованию ОВ в осадочных породах, поэтому содержание кислорода в атмосфере может служить индикатором накопления ОВ в осадочных породах Земли в ходе геологического времени.

Известно, что до возникновения фотосинтеза атмосфера Земли была бескислородной [9, 10]. Содержание кислорода в ней определялось только разложением воды в океане под действием ультрафиолетового солнечного излучения. По мере эволюции фотосинтеза в атмосфере падала концентрация CO_2 , а в соответствии с уравнением фотосинтеза, в земной коре напивалось $\text{C}_{\text{орг}}$. Увеличение содержания кислорода в атмосфере отражает прирост $\text{C}_{\text{орг}}$ в земной коре.

Очевидно, что образование нефти не могло начаться раньше возникновения фотосинтеза, как и сразу с появлением фотосинтеза, поскольку вначале в породах должно было накопиться определенное количество ОВ, достаточное для генерации та-

DISCUSSIONS

Таблица. Оценка средних значений концентраций кислорода в атмосфере на разных этапах эволюции фотосинтеза
Table. Estimation of average oxygen concentration values in the atmosphere in different stages of photosynthesis evolution

Эон	Эра	Возраст, млн лет	Приблизительные средние значения концентраций кислорода в атмосфере, %	Источник
Докембрий	Палеопротерозой	2200–2000	≈ 0,2	[11, 12]
	Неопротерозой	1700–570	2–3	[13]
Фанерозой	Кембрий – девон	570–350	< 15–17	[14–16]
	Карбон – пермь	350–230	25–30	[17]
	Триас – мел	230–145	20	[17, 18]
	Неоген – миоцен	23	23	[19]

кого содержания рассеянных УВ, чтобы образовать УВ-скопление. Сразу после появления фотосинтеза содержание кислорода в атмосфере было очень низкое, а следовательно, низким было и содержание ОВ (таблица). К тому же, как показывают балансовые расчеты коэффициентов эмиграции УВ, количество нефти, генерируемой материнским веществом, составляет лишь несколько процентов его количества [20]. По оценкам Дж. Ханта [21], только 2 % общей массы рассеянного ОВ генерирует УВ и только 0,5 % из них попадает в ловушки. Поэтому для образования нефтяных месторождений должны были накопиться значительные объемы ОВ. Несмотря на всю условность этих оценок, они позволяют составить представление о порядке сопоставляемых величин.

Принимая во внимание приведенные доводы и тот факт, что первые открытые промышленные месторождения нефти образовались в эдиакарии (рифее), когда содержание кислорода в атмосфере составило несколько процентов [22], можно сделать вывод, что месторождения УВ, сформированные в эдиакарии, являются самыми ранними и более древние залежи маловероятны. Раньше указанного возраста содержание кислорода в атмосфере составляло менее 1 %.

Помимо временного ограничения процесса образования новых нефтяных месторождений снизу — периодом, когда, по всей вероятности, возник этот процесс, существует ограничение временем сверху, после которого данный процесс не может продолжаться. Наличие такого ограничения обусловлено способностью глобального фотосинтеза к саморегуляции. Достижение временной границы вызвано переходом глобального цикла углерода в стационарное состояние, когда количество неорганического углерода ($C_{неорг}$), которое прошло через фотосинтез, и количество восстановленного углерода, которое вернулось в окисленную форму в зоне субдукции, становятся одинаковыми. Такое состояние называется экологической точкой компенсации.

В этом случае содержание кислорода в атмосфере и количество $C_{орг}$ в осадочных породах становятся постоянными и обе характеристики начинают осциллировать около некоторых средних значений.

Экологическая точка компенсации была достигнута после миоцена, когда прошла последняя волна нефтеобразования (см. рисунок) и при снижении содержания CO_2 в среде до минимальных значений [23] появились растения с C-4-типом ассимиляции.

Вывод о том, что при достижении экологической точки компенсации глобальный цикл углерода переходит в стационарное состояние, имеет принципиальное значение. Становится очевидным утверждение, что нефть относится к невозобновляемым ресурсам. В самом деле, постоянство осадочного ОВ, источника нефтяных УВ, означает постоянство числа образующихся нефтяных месторождений.

Если объем генерируемой нефти становится постоянным, а скорость ее потребления человеком превышает скорость генерации, то через некоторое время нефть должна закончиться. Если принять оценку Дж. Ханта [21], что только 0,5 % генерированных рассеянных УВ способно накапливаться в ловушках, то появляется принципиальная возможность определить время, которое понадобится, чтобы исчерпать всю нефть. Однако, из-за отсутствия в данный момент необходимых для расчета параметров или слишком грубых их оценок, такой расчет вряд ли имеет смысл.

Признаки, сопутствующие формированию толщ, богатых органическим веществом, и объяснение их возникновения в рамках модели глобального углеродного цикла

При исследовании черных сланцев установлено, что им сопутствуют признаки, свидетельствующие об интенсивном вулканизме [24]. Такое сочетание логично вытекает из модели, поскольку, как отмечалось, толщи, богатые ОВ, образуются на стыке орогенных циклов, когда столкновения литосферных плит приводят к интенсивному вулканизму и магматизму, а на поверхность Земли с вулканическими эксгальциями поступают CO_2 , H_2S и восстановленные изверженные породы, вызывающие резкое изменение климата и массовую гибель многих видов обитающих на Земле организмов. Погребенная биомасса организмов и служит источником углерода для толщ с повышенным содержанием ОВ.

Важным сопутствующим признаком рассматриваемых толщ является возникновение аноксической обстановки. Аноксия отмечена для вод мирового океана (Ocean anoxic events, OAE) со всеми вытекающими последствиями для фауны и флоры [25, 26]. Наступление аноксии с очевидностью вытекает из модели, поскольку при поступлении с магмой восстановленных изверженных пород на окисление забирается большая часть кислорода, накопленного за геосинклинальный период предшествующего цикла.

Необходимо подчеркнуть, что аноксия является еще одним фактором, стимулирующим вместе с биопродуктивностью высокую скорость осадконакопления. Снижение содержания кислорода в орогенный период, действительно, значительно повышает коэффициент фоссилизации ОВ. Однако это способствует накоплению ОВ, но не определяет его.

Третий признак, сопутствующий формированию толщ, богатых ОВ — связь с пиритом (FeS_2) и высокий уровень его осернения [24]. Среднее содержание пирита в глинах баженовской свиты примерно в 10 раз больше соответствующего показателя для осадочно-чехла Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна [27]. Согласно модели глобального круговорота углерода, источником серы для образования пирита, как и для осернения ОВ, является термохимическая сульфатредукция в зоне субдукции. Многие исследователи считают, что источником серы является сероводород, образующийся при сульфатредукции, но при условии, что эта реакция протекает в приповерхностном слое осадков, в зоне микробиальной сульфатредукции. Аргументом в пользу того, что реакция является термохимической, а не микробиальной, является то, что процесс сульфатредукции ассоциируется именно с орогенным периодом цикла, тогда как микробиальная редукция протекает в «мягких» условиях, не требует высоких температур и не привязана ко времени.

Металлогения черных сланцев также служит характерным признаком формирования толщ, богатых ОВ, и означает присутствие в нем повышенных концентраций микроэлементов (Hg, Mo, Ag, Pb, Zn, Cd, Cu, As, Sb и др.) [24, 28]. Этот признак также очевиден, поскольку появление микроэлементов в океанической воде приписывается вулканизму, который происходит в орогенный период. Перечисленные выше элементы, реагируя с сероводородом, поступающим из зоны субдукции, легко образуют сульфиды. Поэтому и пириты, и сульфиды, и осернение ОВ — это признаки, характерные для толщ с повышенной концентрацией ОВ.

Одним из важнейших признаков толщ, богатых ОВ, является изотопная характеристика карбонатного ($\delta^{15}\text{C}_{\text{карб}}$) и органического ($\delta^{15}\text{C}_{\text{орг}}$) углерода. Обычно наблюдается отрицательный сдвиг изотопных характеристик (обогащение легким изотопом ^{12}C), который согласуется с ранее описанными признаками [24, 29, 30].

Действительно, обогащение легким изотопом $\text{C}_{\text{карб}}$ и $\text{C}_{\text{орг}}$ вполне вписывается в предложенную модель углеродного цикла. С началом орогенного периода интенсифицируется термохимическая сульфатредукция, в которой происходит окисление ОВ. Образуется CO_2 , наследующий легкий изотопный состав $\text{C}_{\text{орг}}$ (как результат предшествующего изотопного эффекта фотосинтеза). Этот углекислый газ при попадании в систему атмосфера – гидросфера Земли с более тяжелым углеродом обогащает ее изотопом ^{12}C . Далее $\text{C}_{\text{неорг}}$ вновь вовлекается в фотосинтез. Таким образом, процесс возникновения основных признаков толщ, обогащенных ОВ, может быть обоснован представленной моделью, что позволяет ее использовать.

Выводы

В рамках предложенной ранее гипотезы о глобальном круговороте углерода и взаимодействии геологических и биосферных процессов рассмотрен механизм образования толщ, богатых ОВ. Показано, что накопление этих толщ определяется динамикой фотосинтеза, которая определяется неравномерным движением литосферных плит. В итоге и круговорот углерода, и фотосинтез происходили неравномерно и циклически в форме орогенических циклов, состоящих из короткого орогенного и длительного геосинклинального периодов. Толщи, богатые ОВ, тоже накапливались циклически и были связаны с массовой гибелью организмов, происходившей при смене циклов из-за катастрофического изменения условий их обитания. Погребенная биомасса стала источником углерода нефтепроизводящих толщ, которые обеспечили наблюдаемое неравномерное стратиграфическое распределение мировых залежей нефти (см. рисунок).

Ключевая роль фотосинтеза в формировании нефтегенерирующих толщ позволяет выделить временной отрезок, соответствующий нефтеобразовательному процессу от рифея до палеогена. Начало нефтеобразования определяется временем (от момента возникновения фотосинтеза) накопления ОВ в объемах, достаточных для генерации такого количества рассеянных УВ, которое позволяло образовать залежь. Содержание кислорода в атмосфере в этот момент составило нескольких процентов. Окончание процесса соответствует достижению точки экологической компенсации, т. е. такого состояния глобального цикла углерода, когда количество образованного при фотосинтезе восстановленного углерода стало равным количеству углерода, возвращаемого в окисленную неорганическую форму. Процесс завершился в послемiocеновое время, когда снижение уровня концентрации CO_2 привело к появлению нового вида фотосинтетической ассимиляции и растений типа C-4.

В рамках рассматриваемой модели углеродного цикла в каждом орогеническом цикле с момента зарождения фотосинтеза и вплоть до достижения

DISCUSSIONS

экологической точки компенсации происходило увеличение содержания $C_{орг}$ в земной коре и кислорода в атмосфере. Причем в каждом отдельном орогеническом цикле увеличение концентраций осадочного $C_{орг}$ и кислорода в атмосфере происходило неравномерно в течение всего цикла, а максимум достигался при смене циклов. Инкремент прироста $C_{орг}$ в коре и кислорода в атмосфере менялся неравномерно. Вначале он рос, но по мере приближения к экологиче-

ской точке компенсации инкремент сошел на нет, а глобальный цикл углерода вышел на стационарный уровень и стал осциллировать. Другими словами, нефтегенерационный потенциал земной коры стал постоянным. Если следовать уравнению глобального фотосинтеза и считать кислород индикатором прироста $C_{орг}$ в коре, то наиболее активный прирост происходил во время наиболее интенсивного накопления кислорода в атмосфере.

Литература

1. Ivlev A.A. Global redox cycle of biospheric carbon: interaction of photosynthesis and earth crust processes // *BioSystems*. – 2015. – № 137. – С. 1–11. DOI: 10.1016/j.biosystems.2015.10.001.
2. Hayes J.M., Strauss H., Kaufman A.J. The abundance of ^{13}C in marine organic matter and isotopic fractionation in the global biogeochemical cycle of carbon during the past 800 Ma // *Chemical Geology*. – 1999. – № 161. – С. 103–125. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00083-2.
3. Raup D.M., Sepkosky J.J.Jr. Periodicity of extinctions in the geological past // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 1984. – № 81. – С. 801–805.
4. Hallam A., Wignall P.B. *Mass Extinctions and their Aftermath*. – Oxford : Oxford University Press, 1997. – 328 с.
5. Баженова О.К., Соколов Б.А. Происхождение нефти — фундаментальная проблема естествознания // *Геология нефти и газа*. – 2002. – № 1. – С. 2–7.
6. Вышемирский В.С., Конторович А.Э. Циклический характер нефтенакпления в истории Земли // *Геология и геофизика*. – 1997. – Т. 38. – № 5. – С. 907–918.
7. Корчагин В.И. Общая стратиграфическая шкала и распределение залежей нефти и газа по стратиграфическим подразделениям фанерозоя и докембрия. Таблица, составленная на основании действующего Стратиграфического комплекса. – М. : ВНИГНИ, 2001.
8. Ivlev A.A. Manifestations of Photosynthesis in the Evolution of the Global Carbon Cycle // *Oceanography & Fisheries Open Access Journal (OFOAJ)* [Электронный ресурс]. – 2019. – Т. 9. – № 1. – Режим доступа: <https://juniperpublishers.com/foaj/OFOAJ.MS.ID.555755.php> (дата обращения 26.04.2019). DOI: 10.19080/OFOAJ.2019.08.555755.
9. Rutten M.G. *The origin of life by natural causes*. – Amsterdam, London, New York : Elsevier Publ Co., 1971. – 471 с.
10. Farquhar G.D., Zerkle A.L., Bekker A. Geological constraints on the origin of oxygenic photosynthesis // *Photosynthesis Res.* – 2011. – Т. 107. – № 1. – С. 11–36. DOI: 10.1007/s11120-010-9594-0.
11. Holland H.D. The history of ocean water and its effect on the chemistry of atmosphere // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 1965. – Т. 53. – № 6. – С. 1173–1182. DOI: 10.1073/pnas.53.6.1173.
12. Bjerrum C.J., Canfield D.E. New insights into the burial history of organic carbon on the early Earth // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. – 2004. – Т. 5. – № 8. DOI: 10.1029/2004GC000713.
13. Canfield D.E., Teske A. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen inferred from phylogenetic and sulphur-isotope studies // *Nature*. – 1996. – № 382. – С. 127–132.
14. Berner R.A. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition // *Nature*. – 2003. – № 426. – С. 323–326. DOI: 10.1038/nature02131.
15. Berner R.A., Canfield D.E. A new model for atmospheric oxygen over Phanerozoic time // *American Journal of Science*. – 1989. – Т. 289. – № 4. – С. 333–361. DOI: 10.2475/ajs.289.4.333.
16. Berner R.A., Petsch S.T., Lake J.A., Beerling D.J., Popp B.N., Lane R.S., Laws E.A., Westley M.B., Cassar N., Woodward F.I., Quick W.P. Isotope fractionation and atmospheric oxygen: implications for Phanerozoic O_2 evolution // *Science*. – 2000. – № 287 – С. 1630–1633. DOI: 10.1126/science.287.5458.1630.
17. Lenton T.M. The role of land plants, phosphorous weathering and fire in the rise and regulation of atmospheric oxygen // *Global Change Biology*. – 2001. – № 7. – С. 613–629.
18. Bergman M.J., Lenton T.M., Watson A.G. COPSE: a new model of biogeochemical cycling over Phanerozoic time // *American Journal of Science*. – 2004. – Т. 304. – № 5. – С. 397–437. DOI: 10.2475/ajs.304.5.397.
19. Berner R.A., Kothavala Z. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO_2 over Phanerozoic time // *American Journal of Science*. – 2001. – Т. 301. – № 2. – С. 184–204. DOI: 10.2475/ajs.301.2.182.
20. Ивлев А.А., Четверикова О.П. Модифицированный балансовый метод расчета с целью раздельного учета газообразных и жидких продуктов эмиграции при катагенезе рассеянного органического вещества // *Геология нефти и газа*. – 1983. – № 3. – С. 28–34.
21. Hunt J.M. *Petroleum Geochemistry and Geology*. – San Francisco : W.H. Freeman, 1979. – 617 p.
22. Карасева Т.В., Щербинина Н.Е., Быков В.Н., Белоконов А.В., Башкова С.Е. О дальнейшем развитии геологоразведочных работ на нефть и газ в протерозойских отложениях европейской части России // *Нефтегазовое дело* [Электронный ресурс]. – 2014. – № 3. – С. 1–16. – Режим доступа: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2014/ogbus_3_2014_p1-16_KarasevaTV_ru.pdf (дата обращения 26.04.2019). DOI: <http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2014-3-1-16>.
23. Cerling T.E., Wang Y., Quade J. Expansion of C_4 — ecosystems as an indicator global ecological change in late Miocene // *Nature*. – 1992. – № 361. – С. 344–348. DOI: 10.1038/361344a0.
24. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. *Геохимия черных сланцев*. – Москва, Берлин : Директ-Медиа, 2015. – 272 с.

25. Chen R., Sharma Sh. Linking the Acadian Orogeny with organic-rich black shale deposition: Evidence from the Marcellus Shale // *Marine and Petroleum Geology*. – 2001. – № 79. – С. 149–58.
26. Luciani V., Cobianchi M., Jenkyns H.C. Biotic and geochemical response to anoxic events: the Aptian pelagic succession of the Gargano Promontory (southern Italy) // *Geological Magazine*. – 2016. – Т. 138. – № 3. – С. 277–298. DOI: 10.1017/S0016756801005301.
27. Брадучан Ю.В., Гурари Ф.Г., Захаров В.А. и др. Баженовский горизонт Западной Сибири (стратиграфия, палеогеография, экосистема, нефтеносность). – Новосибирск : Наука, 1986. – 217 с.
28. Large R.R., Halpin J.A., Lounejeva E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V. V., Gregory D., Sack P.J., Haines P.W., Long J.A., Makoundi C., Stepanov A.S. Cycles of nutrient trace elements in the Phanerozoic ocean // *Gondwana Research*. – 2015. – Т. 28. – № 4. – С. 1282–1293. DOI: 10.1016/j.gr.2015.06.004.
29. Muraoka H., Tang Y., Terashima I., Koizumi H., Washitani I. Contributions of diffusional limitation, photoinhibition and photorespiration to midday depression of photosynthesis in *Arisaema heterophyllum* in natural high light // *Plant Cell Environment*. – 2000. – Т. 23. – № 3. – С. 235–250. DOI: 10.1046/j.1365-3040.2000.00547.x.
30. Goričan Š., Carter E.S., O'Dogherty G.L., Guex J., O'Dogherty L., De Wever P., Dumitrica P., Hori R.S., Matsuoka A., Whalen P.A. Evolutionary patterns and palaeobiogeography of Pliensbachian and Toarcian (Early Jurassic) Radiolaria // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. – 2013. – Т. 386. – № 15. – С. 620–636. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.028.

References

- Ivlev A.A. Global redox cycle of biospheric carbon: interaction of photosynthesis and earth crust process. *BioSystems*. 2015;(137):1–11. DOI: 10.1016/j.biosystems.2015.10.001.
- Hayes J.M., Strauss H., Kaufman A.J. The abundance of ¹³C in marine organic matter and isotopic fractionation in the global biogeochemical cycle of carbon during the past 800 Ma. *Chemical Geology*. 1999;(161):103–125. DOI: 10.1016/s0009-2541(99)00083-2.
- Raup D.M., Sepkosky J.J.Jr. Periodicity of extinctions in the geological past. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1984;(81):801–805.
- Hallam A., Wignall P.B. Mass Extinctions and their Aftermath. Oxford: Oxford University Press; 1997. 328 p.
- Bazhenova O.K., Sokolov B.A. Origin of oil: fundamental problem of natural history [Proiskhozhdenie nefiti — fundamental'naya problema estestvoznaniya]. *Geologiya nefi i gaza*. 2002;(1):2–7.
- Vyshemirskii V.S., Kontorovich A.E. Cyclical pattern of oil accumulation in the Earth history [Tsiklicheskiy kharakter neftenakopleniya v istorii Zemli]. *Geologiya i geofizika = Russian geology and geophysics*. 1997;38(5):907–918.
- Korchagin V.I. General stratigraphic chart and distribution of oil and gas pools within Phanerozoic and Pre-Cambrian stratigraphic frameworks. Table based on the current Stratigraphic Code. [Obshchaya stratigraficheskaya shkala i raspredelenie zalezhei nefi i gaza po stratigraficheskim podrazdeleniyam fanerozoia i dokembriya. Tablitsa, sostavlenaya na osnovanii deistvuyushchego Stratigraficheskogo kompleksa]. Moscow: VNIGNI; 2001.
- Ivlev A.A. Manifestations of Photosynthesis in the Evolution of the Global Carbon Cycle. *Oceanography & Fisheries Open Access Journal (OFOAJ)*. 2019;9(1). Available at: <http://www.ogbus.ru> (accessed 26.04.2019). DOI: 10.19080/OFOAJ.2019.08.555755.
- Rutten M.G. The origin of life by natural causes. Amsterdam, London, New York: Elsevier Publ Co.; 1971. 471 p.
- Farquhar G.D., Zerkle A.L., Bekker A. Geological constraints on the origin of oxygenic photosynthesis. *Photosynthesis Res*. 2011;(107):11–36. DOI: 10.1007/s11120-010-9594-0.
- Holland H.D. The history of ocean water and its effect on the chemistry of atmosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1965;53(6):1173–1182. DOI: 10.1073/pnas.53.6.1173.
- Bjerrum C.J., Canfield D.E. New insights into the burial history of organic carbon on the early Earth. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2004;5(8). DOI: 10.1029/2004GC000713.
- Canfield D.E., Teske A. Late Proterozoic rise in atmospheric oxygen inferred from phylogenetic and sulphur-isotope studies. *Nature*. 1996;(382):127–132.
- Berner R.A. The long-term carbon cycle, fossil fuels and atmospheric composition. *Nature*. 2003;(426):323–326. DOI: 10.1038/nature02131.
- Berner R.A., Canfield D.E. A new model for atmospheric oxygen over Phanerozoic time. *American Journal of Science*. 1989;289(4):333–361. DOI: 10.2475/ajs.289.4.333.
- Berner R.A., Petsch S.T., Lake J.A., Beerling D.J., Popp B.N., Lane R.S., Laws E.A., Westley M.B., Cassar N., Woodward F.I., Quick W.P. Isotope fractionation and atmospheric oxygen: implications for Phanerozoic O₂ evolution. *Science*. 2000;(287):1630–1633. DOI: 10.1126/science.287.5458.1630.
- Lenton T.M. The role of land plants, phosphorous weathering and fire in the rise and regulation of atmospheric oxygen. *Global Change Biology*. 2001;(7):613–629.
- Bergman M.J., Lenton T.M., Watson A.G. COPSE: a new model of biogeochemical cycling over Phanerozoic time. *American Journal of Science*. 2004;304(5):397–437. DOI: 10.2475/ajs.304.5.397.
- Berner R.A., Kathavala Z. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*. 2001;301(2):184–204. DOI: 10.2475/ajs.301.2.182.
- Ivlev A.A., Chetverikova O.P. Separate accounting of gaseous and liquid products of expulsion in catagenesis of particulate organic matter: modified balancing method of calculations [Modifitsirovannyi balansovyi metod rascheta s tsel'yu razdel'nogo ucheta gazoobraznykh i zhidkikh produktov emigratsii pri katageneze rasseyanogo organicheskogo veshchestva]. *Geologiya nefi i gaza*. 1983;(3):28–34.
- Hunt J.M. Petroleum Geochemistry and Geology. San Francisco: W.H. Freeman; 1979. 617 p.

DISCUSSIONS

22. Karaseva T.V., Shcherbinina N.E., Bykov V.N., Belokon A.V., Bashkova S.E. On further development of exploration for oil and gas in proterozoic European Russia [O dal'neishem razvitii geologorazvedochnykh rabot na neft' i gaz v proterozoiskikh otlozheniyakh evropeiskoi chasti Rossii]. *Neftegazovoe delo = Oil and Gas Business*. 2014;(3):1–16. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/3_2014/ogbus_3_2014_p1-16_KarasevaTV_ru.pdf (accessed 26.04.2019). DOI: <http://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2014-3-1-16>.
23. Cerling T.E., Wang Y., Quade J. Expansion of C₄ — ecosystems as an indicator global ecological change in late Miocene. *Nature*. 1992;(361):344–348. DOI: 10.1038/361344a0.
24. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Geochemistry of black shale [Geokhimiya chernykh slantsev]. Moscow, Berlin: Direkt-Media; 2015. 272 p.
25. Chen R., Sharma Sh. Linking the Acadian Orogeny with organic-rich black shale deposition: Evidence from the Marcellus Shale. *Marine and Petroleum Geology*. 2001;(79):149–58.
26. Luciani V., Cobianchi M., Jenkyns H.C. Biotic and geochemical response to anoxic events: the Aptian pelagic succession of the Gargano Promontory (southern Italy). *Geological Magazine*. 2016;138(3):277–298. DOI: 10.1017/S0016756801005301.
27. Braduchan Yu.V., Gurari F.G., Zakharov V.A. et al. Bazhenov Horizon in Western Siberia (stratigraphy, paleogeography, ecosystem, oil bearing capacity) [Bazhenovskii gorizont Zapadnoi Sibiri (stratigrafiya, paleogeografiya, ekosistema, neftenosnost')]. Novosibirsk: Nauka; 1986. 217 p.
28. Large R.R., Halpin J.A., Lounejeva E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V.V., Gregory D., Sack P.J., Haines P.W., Long J.A., Makoundi C., Stepanov A.S. Cycles of nutrient trace elements in the Phanerozoic ocean. *Gondwana Research*. 2015;28(4):1282–1293. DOI: 10.1016/J.GR.2015.06.004.
29. Muraoka H., Tang Y., Terashima I., Koizumi H., Washitani I. Contributions of diffusional limitation, photoinhibition and photorespiration to midday depression of photosynthesis in *Arisaema heterophyllum* in natural high light. *Plant Cell Environment*. 2000;23(3):235–250. DOI: 10.1046/j.1365-3040.2000.00547.x.
30. Goričan Š., Carter E.S., O'Dogherty G.L., Guex J., O'Dogherty L., De Wever P., Dumitrica P., Hori R.S., Matsuoka A., Whalen P.A. Evolutionary patterns and palaeobiogeography of Pliensbachian and Toarcian (Early Jurassic) Radiolaria. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2013;386(15):620–636. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.06.028.